

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ БЕСПИЛОТНОЙ ГУСЕНИЧНОЙ ПЛАТФОРМЫ С БОРТОВОЙ ГИДРОСТАТИЧЕСКОЙ ТРАНСМИССИЕЙ

*С.В. Кондаков, О.О. Павловская, Е.А. Горелый, Н.К. Горяев*

Приведены результаты исследования алгоритмов управления криволинейным движением гусеничной машины с бесступенчатой трансмиссией в беспилотном режиме на основе анализа математической модели человека-оператора, обладающего свойством предвидения дорожной ситуации. Определены параметры автоматической системы, способной заменить человека. Результаты могут быть использованы при проектировании автоматических гусеничных платформ гражданского и военного назначения.

Ключевые слова: беспилотная платформа, автоматическая система управления движением, гидрообъёмная передача, параметр регулирования, упреждение, оптимизация управления.

В последнее время все большее пристальное внимание уделяется вопросам теории и практики использования гидростатических трансмиссий [1]. Эффективность их применения в силовых приводах тяжёлых колёсных и гусеничных машин растёт по мере увеличения тягового класса таких машин [2]. В связи с этим и математическое моделирование процессов работы гидрообъёмной передачи (ГОП) получает развитие, с точки зрения оптимизации их управления [3]. Испытания ГОП в составе МТУ гусеничных машин различного назначения проводятся достаточно давно и показали на практике их эффективность [4]. Исследования последних лет связаны с вопросами управляемости транспортных средств человеком и автоматическими системами [5], в том числе через автоматизацию ГОП и создание совершенно новых транспортных платформ, способных ориентироваться в пространстве и перемещаться без непосредственного контроля человека.

Внедрение в технологические процессы беспилотных транспортных средств является актуальной задачей для многих производств, в которых использование традиционного управления человеком вручную либо экономиче-

ски невыгодно (внутрицеховые, складские перевозки по стандартным маршрутам), либо опасно для жизни человека (вредные производства, заражённые местности, зоны боевых действий). В ряде случаев оператора на машине можно заменить радиоуправлением, но в этом случае человек всё-таки задействован в работе. Особый интерес представляют производства, где человека можно полностью исключить из техпроцесса, заменив его автоматической системой управления движением транспорта.

Объектом математического моделирования является транспортная платформа с двигателем внутреннего сгорания (ДВС), гидростатической трансмиссией, выполненной по бортовой схеме, и гусеничным движителем. Прототипом платформы является промышленный трактор класса 15 т производства ОАО «Завод дорожно-строительной техники «Урал», г. Челябинск.

Структурная схема моторно-трансмиссионной установки платформы представлена на рис. 1. Управление движением осуществляется регулированием подачи насосов ГОП, при нерегулируемых моторах. При прямолинейном движении насосы регулируются синхронно, а при повороте изменением подачи насоса одного из бортов.

Расчётная схема движения гусеничной платформы, справедливая для любой гусеничной машины, приведена на рис. 2.

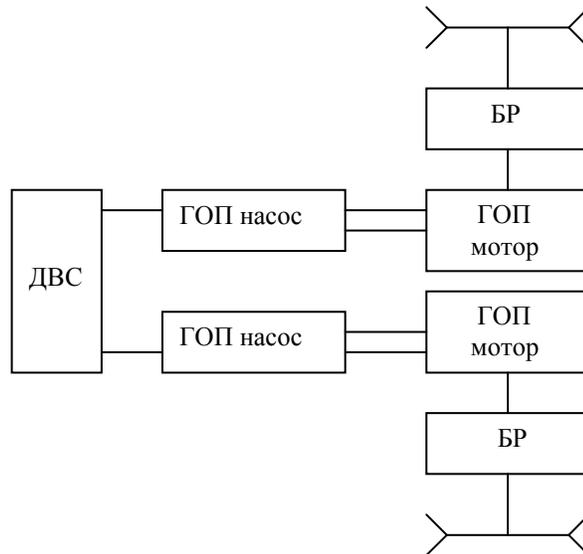


Рис. 1. Структурная схема моторно-трансмиссионной установки платформы

Математическая модель движения платформы на плоскости представляет собой систему трёх дифференциальных уравнений второго порядка [6–8]:

$$\frac{d^2 X_c}{dT^2} = [(T_{x2} + T_{x1} - F_1 - F_2) \sin \varphi + (T_{y2} + T_{y1}) \cos \varphi] \frac{g}{G};$$

$$\frac{d^2 Y_c}{dT^2} = \left[ (T_{x2} + T_{x1} - F_1 - F_2) \cos \varphi - (T_{y2} + T_{y1}) \sin \varphi \right] \frac{g}{G};$$

$$\frac{d^2 \varphi}{dT^2} = \left[ \left( T_{y2} \left( \frac{B}{2} + x_2 \right) - T_{y1} \left( \frac{B}{2} - x_1 \right) + F_1 - F_2 \right) \frac{B}{2} - \text{sign} \frac{d\varphi}{dT} M_c \right] \frac{1}{J_c};$$

где  $M_c$  – момент сопротивления повороту, формирующийся силами и моментами трения,  $G$  – вес платформы,  $J_c$  – момент инерции платформы относительно вертикальной оси, проходящей через центр тяжести.

Моторно-трансмиссионная установка имеет три степени свободы и описывается тремя дифференциальными уравнениями первого порядка:

$$\frac{d\omega_\partial}{dt} = \left[ M_\partial - M_{н1} - M_{н2} \right] \frac{1}{J_1};$$

$$\frac{d\omega_{м1}}{dt} = \left[ M_{м1} - \frac{P_1 R_{вк}}{i_{бп}} \right] \frac{1}{J_2};$$

$$\frac{d\omega_{м2}}{dt} = \left[ M_{м2} - \frac{P_2 R_{вк}}{i_{бп}} \right] \frac{1}{J_3};$$

где  $\omega_\partial$ ,  $\omega_{м1}$ ,  $\omega_{м2}$  – угловые скорости валов ДВС и моторов ГОП,  $M_\partial$ ,  $M_{н1}$ ,  $M_{н2}$  – крутящие моменты на валах ДВС и насосов гидрообъемных передач (ГОП),  $M_{м1}$ ,  $M_{м2}$  – моменты на моторах ГОП,  $R_{вк}$  – радиус ведущего колеса,  $i_{бп}$  – передаточное число бортового редуктора,  $J_1$ ,  $J_2$ ,  $J_3$  – моменты инерции соответствующих масс.

Гидрообъемные передачи (ГОП) – уравнениями для давления в каждой из магистралей:

$$\frac{dP_{11}}{dt} = \left( Q_{н1} - Q_{м1} - Q_{k11} + Q_{k12} + Q_{кпп11} - \Delta Q_{н11} - \Delta Q_{м11} \right) \frac{E}{V_1};$$

$$\frac{dP_{12}}{dt} = \left( Q_{м1} - Q_{н1} + Q_{k11} - Q_{k12} + Q_{кпп12} - \Delta Q_{н12} - \Delta Q_{м12} \right) \frac{E}{V_2};$$

$$\frac{dP_{21}}{dt} = \left( Q_{н2} - Q_{м2} - Q_{k21} + Q_{k22} + Q_{кпп21} - \Delta Q_{н21} - \Delta Q_{м21} \right) \frac{E}{V_1};$$

$$\frac{dP_{22}}{dt} = \left( Q_{м2} - Q_{н2} + Q_{k22} - Q_{k21} + Q_{кпп22} - \Delta Q_{н22} - \Delta Q_{м22} \right) \frac{E}{V_2};$$

где  $P_{11}$ ,  $P_{12}$  – давления в магистральных первой ГОП,  $P_{21}$ ,  $P_{22}$  – давления в магистральных второй ГОП,  $Q_{н1}$ ,  $Q_{м1}$  – расходы насоса и мотора первой ГОП,  $Q_{н2}$ ,  $Q_{м2}$  – расходы насоса и мотора второй ГОП,  $Q_{k11}$ ,  $Q_{k12}$ ,  $Q_{k21}$ ,  $Q_{k22}$  – расходы предохранительных клапанов,  $Q_{кпп11}$ ,  $Q_{кпп12}$ ,  $Q_{кпп21}$ ,  $Q_{кпп22}$  – расходы клапанов подпитки,

$\Delta Q_n$   $\Delta Q_m$  – утечки в насосах и моторах [9]. Каждая из магистралей ГОП может быть высокого или низкого давления в зависимости от условий движения (вперёд–назад, поворот вправо–влево, переходные процессы движения: разгон–торможение, вход–выход из поворота).

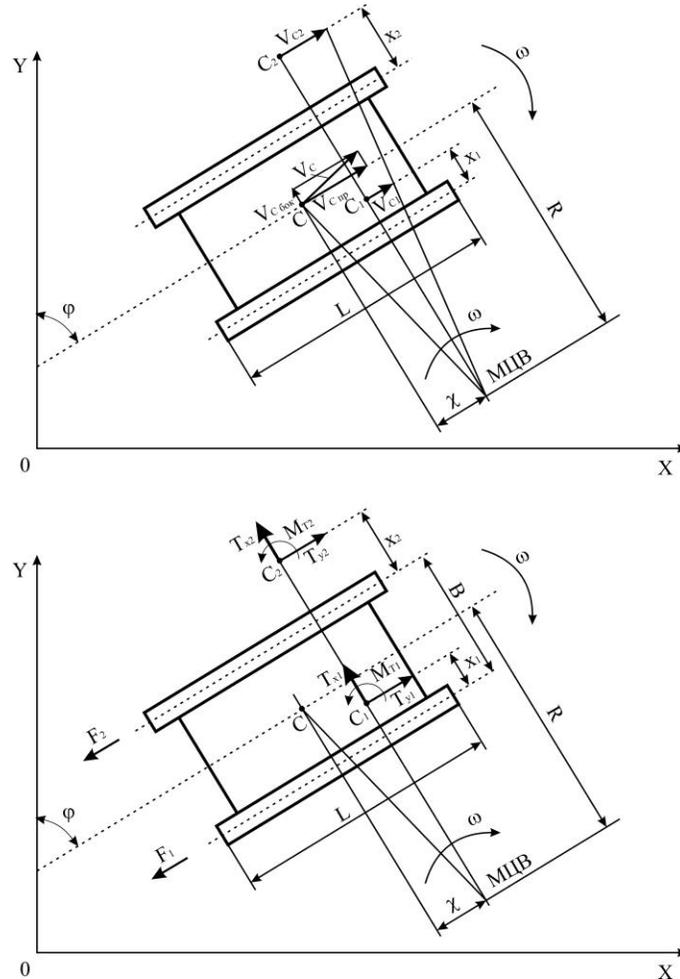


Рис. 2. Расчетная схема:  $X, Y$  – декартовы координаты,  $\varphi$  – курсовой угол, МЦВ – мгновенный центр вращения,  $F_1, F_2$  – силы сопротивления на отстающем и забегающем борту,  $V_c$  – линейная скорость центра тяжести,  $\chi$  – продольное смещение полюса поворота,  $L$  – продольная база машины,  $B$  – поперечная база машины,  $x_1$  – поперечное смещение полюса поворота отстающей гусеницы,  $x_2$  – поперечное смещение полюса поворота забегающей гусеницы,  $V_{C\text{бок}}$  – составляющая  $V_c$ , направленная перпендикулярно оси корпуса машины,  $V_{C\text{пр}}$  – составляющая  $V_c$ , направленная вдоль оси корпуса машины,  $T_{x1}, T_{y1}$  – составляющие результирующей силы трения отстающей гусеницы о грунт,  $T_{x2}, T_{y2}$  – составляющие результирующей силы трения забегающей гусеницы о грунт,  $M_{т1}, M_{т2}$  – результирующие моменты трения отстающей и забегающей гусениц относительно полюсов поворота  $C_1$  и  $C_2$  соответственно,  $\omega = d\varphi/dt$  – угловая скорость поворота корпуса,  $V_{C1}, V_{C2}$  – скорости полюсов поворота отстающей и забегающей гусениц соответственно.

Управление движением платформы осуществляется изменением производительности (подачи) насосов ГОП. Гидромоторы имеют два режима – рабочий и транспортный. Иными словами, насосы непрерывно регулируемые, а моторы двухпозиционные. При движении прямо насосы регулируются синхронно, а при повороте уменьшается подача насоса отстающего борта.

**Задачей данного исследования является отработка алгоритма управления движением платформы по произвольной криволинейной траектории в автономном беспилотном режиме.**

Необходимым условием реализации поставленной задачи являются наличие ориентиров на местности и соответствующих датчиков на платформе. В качестве одного из вариантов в данном случае траектория задана линией на местности, а платформа оборудована системой датчиков, замеряющих отклонение этой линии от продольной оси платформы. Датчики установлены на некотором расстоянии перед центром тяжести платформы и таким образом формируют сигнал о кривизне дороги с некоторым упреждением. Пересчет показаний датчиков расстояния в кривизну траектории (рис. 3) осуществляется по формуле:

$$Kr = \frac{2x}{\Delta L^2},$$

где  $x$  – отклонение линии на местности от продольной оси платформы,  $\Delta L$  – расстояние от центра тяжести до места установки датчиков. Сделано допущение что при малых  $x$  центр тяжести  $A$  и точка  $C$  на местности принадлежат одной окружности радиуса  $R = \frac{1}{Kr}$ , а в прямоугольном треугольнике  $\Delta ABC$  гипотенуза близка по длине большему катету.

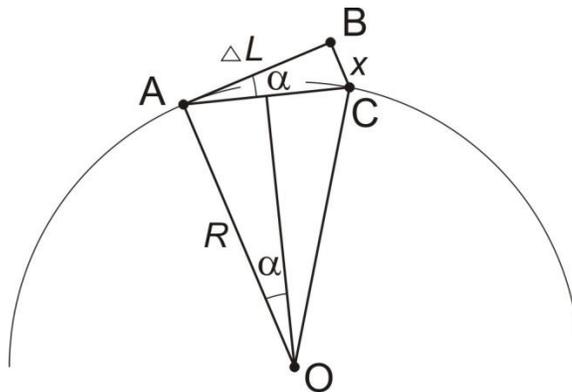


Рис. 3. Геометрическая связь между отклонением  $x$  продольной оси машины от траектории дороги и кривизной траектории  $Kr$  на расстоянии  $\Delta L$  от центра тяжести

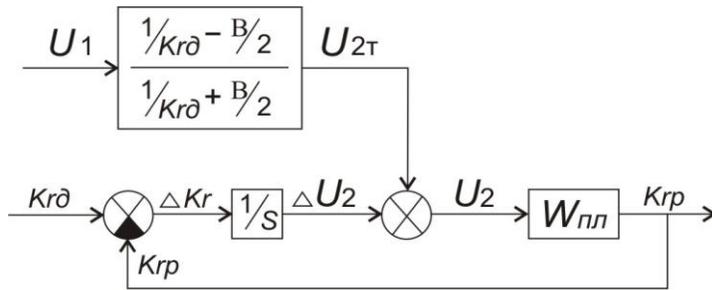


Рис. 4. Структурная схема АС управления движением беспилотной гусеничной платформы

Автоматическая система (АС) управления подачей насоса отстающего борта (рис. 4) работает следующим образом: опорный сигнал  $U_1$  подачи насоса забегающего борта задает скорость прямолинейного движения платформы. В случае нулевой

кривизны проложенной трассы и отсутствии внешних помех движению параметр регулирования подачи насоса отстающего борта  $U_2 = U_1$  и платформа движется прямо. При появлении помех, например буксования одной из гусениц, или утечек в одной из ГОП, АС по разности кривизны реальной траектории центра тяжести и заданной линией на местности корректирует подачу насоса отстающего борта и прямолинейное движение восстанавливается. При повороте соотношение  $U_1$  и  $U_2$  задается кривизной трассы, что схеме. Единичная обратная связь и интегрирующее звено обеспечивают точное соответствие кривизны траектории центра тяжести проложенной на местности линии маршрута.

На рис. 4  $Krd$  – кривизна линии маршрута,  $Krp$  – кривизна траектории центра тяжести платформы, вычисляемая в модели по формуле:

$$Krp = \frac{d\varphi/dt}{\sqrt{(dX/dt)^2 + (dY/dt)^2}} .$$

Математическая модель и алгоритм управления движением беспилотной гусеничной платформы реализован в среде программирования VISSIM. В качестве иллюстрации качества управления на рис. 5 приведён эпизод входа в поворот с кривизной линии маршрута  $Krd = 0.06 м^{-1}$ . Скорость движения платформы 0,6 м/с соответствует внутрицеховому безопасному маневрированию.

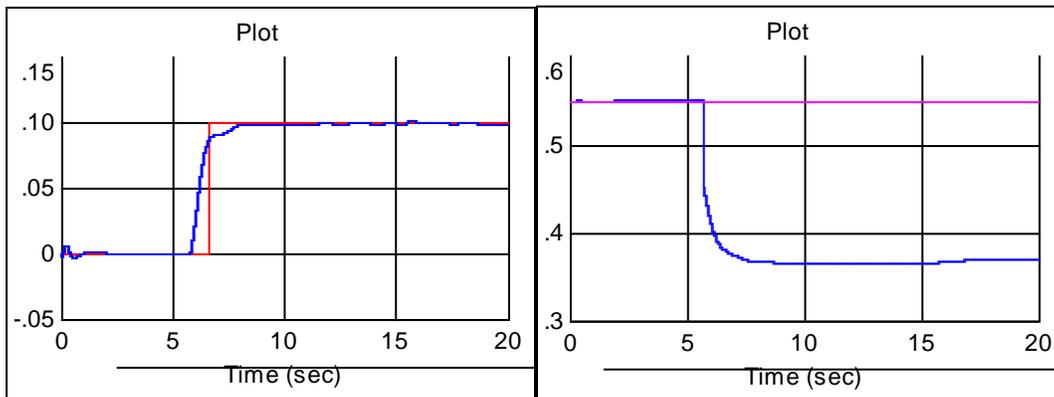


Рис. 5. Траектории и параметры регулирования

Расположение датчика впереди центра тяжести позволило ввести упреждающее управление, что соответствует управлению человеком, следящим за дорогой перед машиной. Расстояние между центром тяжести платформы и датчиками, следящими за линией на местности, определено из соображений наилучшего соответствия качества автоматического регулирования качеству регулирования опытным человеком-оператором.

Полученный результат является развитием математического представления о модели человека, управляющего транспортным средством [6, 10–13]. Для сравнения приведен график на рис. 6 (из ранее опубликованных работ авторов), иллюстрирующий переходный процесс входа в поворот гусеничной машины, управляемой человеком по информации о кривизне дороги непосредственно под центром тяжести машины, то есть не предвидящим развитие дорожной ситуации. В этом смысле представленная в данной статье модель является более полной, дополнительно включающей важное свойство человека-оператора, такое как предвидение.

Сравнение графиков на рисунках 5 и 6 указывает на большее соответствие реальному процессу управления поворотом именно рис. 5, поскольку поворот штурвала начинается до входа в поворот, что соответствует работе человека как управляющего звена.

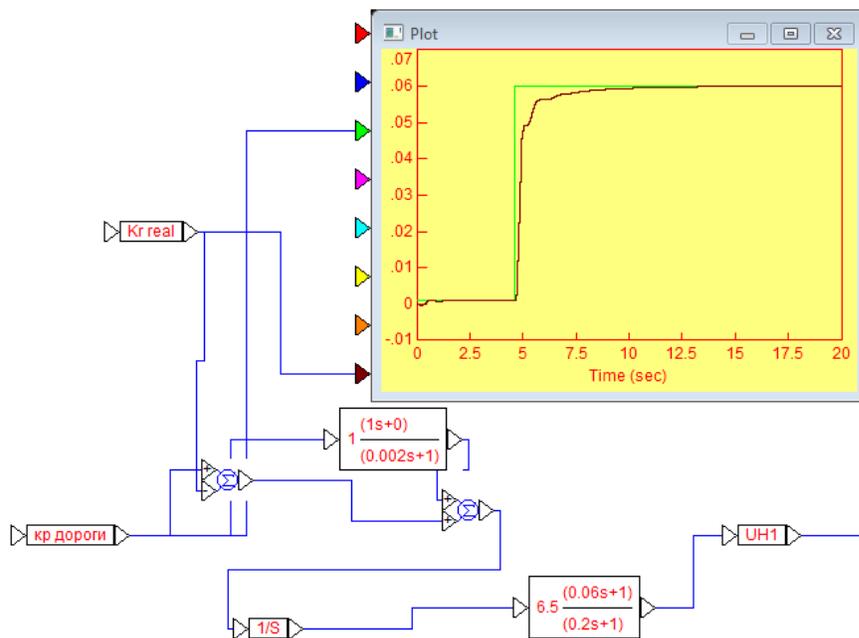


Рис. 6. Переходная характеристика системы управления БГМ при найденных программным путем параметрах модели механика-водителя ( $K_{2\text{опт}}$ ;  $T_{2\text{опт}}$ ) [6, 13]

### Выводы

- развиты вопросы теории моделирования человека-оператора, управляющего гусеничной машиной, количественно определены величины, характеризующие оценку человеком развития дорожной ситуации, сделано предположение о возможности выполнения этих функций автоматической системой управления криволинейным движением, ориентирующейся на дороге аналогично человеку;
- представлена математическая модель движения гусеничной машины с бортовой гидростатической трансмиссией;
- определён алгоритм управления движением беспилотной гусеничной платформы, основанный на упреждающем воздействии на подачу насоса ГОП отстающего борта в пропорции, определяемой кривизной линии маршрута, и корректирующий подачу насоса отстающего борта по отклонению кривизны траектории центра тяжести от заданного маршрута;
- анализ переходного процесса входа в поворот показал приемлемое качество регулирования.

### Библиографический список

1. Karl Th. Renius, Rainer Resch. 2005. Continuously Variable Tractor Transmissions. ASAE Distinguished Lecture No. 29, pp. 1–37.
2. Karl-Erik Rydberg. 1997. Hydrostatic Drives in Heavy Mobil Machinery – New Concept and Development Trends. Linkoping University. SAE paper No. 981989. ASAE.
3. Ali Volkan Akkaya. 2006. Effect of bulk modulus on performance of a hydrostatic transmission control system. Yildiz Technical University, Turkey. Sadhana Vol. 31, Part 5, October 2006, pp. 543–556.
4. Installation and test of hydrostatic drive transmission in a government furnished M-113 vehicles. David Taylor Research Center. Monitoring organization report number DTRC-SSID-CR-6-89. – URL: <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a204960.pdf>.
5. Iliyan Lilov, Lalyo Lalev. 2006. Mathematical Modeling of Processes in the System Environment-Driver-Caterpillar Vehicle for Motion on Rout with Changeable Structure. – URL: [http://www.actrus.ro/reviste/3\\_2006\\_eng/a15.pdf](http://www.actrus.ro/reviste/3_2006_eng/a15.pdf).
6. Кондаков, С.В. Автоматизированное управление движением быстроходной гусеничной машины: монография / С.В. Кондаков, О.О. Павловская. – Saarbrucken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. – 105 с.
7. Кондаков, С.В. Повышение подвижности быстроходной гусеничной машины путем автоматизации системы управления криволинейным движением: монография / С.В. Кондаков. – Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 2009. – 108 с.

8. Кондаков, С.В. Интеллектуальная бесступенчатая трансмиссия – регулятор расхода топлива ДВС и крутящего момента ведущих колёс / С.В. Кондаков, О.О. Павловская // Вестник машиностроения. – 2013. – № 7. – С. 3–11.

9. Объёмные гидромеханические трансмиссии / под ред. Е.С. Кисточкина. – Л.: Машиностроение, 1987. – 256 с.

10. Кондаков, С.В. Исследование подвижности быстроходной гусеничной машины при движении по заданной трассе / С.В. Кондаков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2010. – Вып. 15. – № 10 (186). – С. 63–66.

11. Кондаков, С.В. Имитационное моделирование движения быстроходной гусеничной машины с механиком-водителем / С.В. Кондаков, Н.Н. Корнаева, О.О. Павловская, С.И. Черепанов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2010. – Вып. 16. – № 29(205). – С. 59–64.

12. Павловская, О.О. Методы определения параметров линейной математической модели человека-оператора / О.О. Павловская // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2007. – Вып. 5. – № 7(79). – С. 41–44.

13. Павловская, О.О. Алгоритм определения параметров математической модели механика-водителя, управляющего криволинейным движением быстроходной гусеничной машины / О.О. Павловская, С.В. Кондаков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2012. – Вып. 15. – № 2 (262). – С. 43–47.